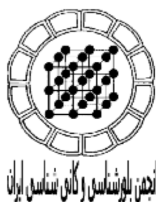
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال بیست و سوم، شماره‌ی اول، بهار ۹۴، از صفحهٔ ۷۵ تا ۸۶



کانی‌شناسی و زمین‌شیمی دگرسانی‌های گرمابی در رخداد یارالوجه، (شمال‌غرب اهر- آذربایجان‌شرقی)

زهره جبارزاده*[۱]، محمدرضا حسین‌زاده[۱]، محسن مؤید[۱]، رزگار فرامرزی[۲]

۱-گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲-گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

(دریافت مقاله: ۹۲/۷/۶، نسخه نهایی: ۹۲/۱۰/۱۵)

چکیده: رخدادهای رگه‌ای یارالوجه در ۴۰ کیلومتری شمال‌غرب اهر، استان آذربایجان‌شرقی واقع شده است. سنگ میزبان رگه‌های کانه‌سازی شده، مجموعه‌ای از سنگ‌های نیمه‌آتشفشانی حدواسط دگرسان شده است. کانی‌سازی اسفالریت-گالن-کالکوپیریت به صورت رگه-رگچه‌ای تداخلی است. براساس مشاهدات صحرایی، بافتی و کانی‌شناسی ۴ مرحله کانی‌سازی تشخیص داده شده‌اند. سنگ‌های نیمه‌آتشفشانی به وسیله دگرسانی فراگیر سریسیتی و کربناتی، که با مجموعه کانی‌های برونزاد هم‌پوشانی دارد، تحت تأثیر قرار گرفته است. ترسیم شاخص دگرسانی ایشیکاوا (AI) نسبت به شاخص کلریت-کربنات-پیریت (CCPI)، موسوم به نمودار جعبه‌ای دگرسانی، انواع اصلی دگرسانی را نشان می‌دهد. مجموعه‌ی کوارتز، سریسیت، ایلیت، آلبیت، کائولینیت، لوکوکسن، پیریت و کانی‌های کربناتی تأخیری، نشانگر حضور سیالات گرمابی (گرماب) با pH نزدیک به خنثی و دمای تقریبی ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. ویژگی‌های کانی‌شناسی، دگرسانی و زمین‌شیمیایی منطقه‌ی مورد بررسی و مقایسه آن با دیگر کانسارهای گرمابی نشان دهنده‌ی این است که اندیس‌های رگه‌ای یارالوجه مشابه با کانسارهای وراگرما نوع سولفیدی شدن حدواسط و رگه‌های چند فلزی با دمای متوسط وابسته به کانسارهای مس پورفیری است.

واژه‌های کلیدی: *وراگرما؛ مس پورفیری؛ دگرسانی گرمابی؛ شاخص دگرسانی؛ سولفیدی شدن حدواسط؛ یارالوجه.*

مقدمه

کانسارهای گرمابی یکی از مهم‌ترین انواع کانسارها هستند که تقریباً ۱۰۰ درصد فلزاتی چون سرب، روی، مولیبدن، نقره و ۶۰ الی ۹۰ درصد مس، طلا و اورانیوم مورد نیاز جهان را تأمین می‌کنند [۱]. موضوع جالب توجه در این کانسارها، دگرسانی گرمابی وابسته به کانی‌سازی است، که به طور معمول دارای منطقه‌بندی کانیایی و زمین‌شیمیایی است [۲]. شناسایی رابطه‌ی بین کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و شدت دگرسانی در سیستم‌های دگرسانی دارای منطقه‌بندی به عنوان ابزاری سودمند برای پی‌جویی این کانسارها به کار می‌رود [۳]. از آنجا که این دگرسانی‌ها با تغییرات کانی‌شناسی، شیمیایی و بافتی سنگ دیواره مشخص می‌شوند، با تشکیل کانی‌های گرمابی متنوعی همراهند که اغلب به تغییرات دما و pH حساس بوده [۴] و می‌توانند اطلاعات مفیدی را درباره ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال گرماب ارائه کنند [۵]. برای آگاهی بهتر دگرسانی گرمابی و شدت آن می‌توان علاوه بر بررسی‌های کانی‌شناسی از داده‌های زمین‌شیمیایی نمونه‌های دگرسان شده سنگ میزبان و نمودار جعبه‌ای دگرسانی استفاده کرد [۶].

اندیس رگه‌ای یارالوجه با موقعیت جغرافیایی ۴۶°۵۳'۵۴˝ تا ۴۶°۵۵'۰۰˝ طول شرقی و ۳۸°۴۲'۰۰˝ تا ۳۸°۴۳'۳۷˝ عرض

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۹۳۱۹۱۱۷، پست الکترونیکی: Zohreh.jabarzadeh@yahoo.com

شـمالی در فاصـله‌ی ۴۰ کیلـومتری شـمال‌غـرب اهـر و ۱۷ کیلومتری شمال‌شرقی معدن سـونگون آذربایجـان‌شـرقی قـرار دارد. بررسی‌های انجام شده روی این منطقه تنها شامل تهیـه‌ی نقشه‌ی زمـین‌شناسـی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقـان [۷] اسـت. از اینـرو اطلاعات جامع و دقیقی درباره ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زائی این شاخص وجود ندارد و روی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، کانی‌شناسی و بافتی آن تاکنون مطالعه‌ای انجام نگرفتـه اسـت. در این مقاله ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌سـازی و دگرسـانی گرمابی بر پایه‌ی مشاهدات صحرایی، بررسی‌های میکروسـکوپی و زمین‌شیمی کل سنگ انجام گرفته و درباره الگوی کانی‌سازی اظهار نظر شده است.

روش بررسی

برای بررسی ماهیت کانی‌سازی و دگرسانی گرمـابی در منطقـه یارالوجه، بررسی‌ها در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی صـورت گرفـت. در بخـش صـحرایی، زمـین‌شناسـی منطقـه، تغییـرات ریخت‌شناسی رگه‌ها و دگرسـانی گرمـابی سـنگ دیـواره مـورد بررسـی قـرار گرفـت و از رخنمـون رگـه‌هـا و سـنگ دیـواره‌ی دگرسان شده در دیواره دره‌ها نمونه برداری شـد. بررسـی‌هـای آزمایشگاهی شامل بررسی‌های بافتی و کانی‌شناسی کانـسنگ و سنگ‌دیواره، مجموعه‌های دگرسانی و تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌هـا بـوده اسـت. بررسـی‌هـای بـافتی و کـانی‌شناسـی بـه روش میکروسکوپی روی ۲۸ عـدد مقطـع نـازک و ۹ مقطـع صـیقلی انجام شد. کانی‌های مجهول در ۳ نمونـه بـه روش پـراش پرتـو مجهول (XRD) توسط شرکت زرآزما شناسایی شد (جدول ۱). با ترکیب نتایج حاصل از این بررسی‌ها دنباله‌ی پاراژنزی کـانی‌سازی و مجموعه‌های دگرسان گرمابی تعیین شد. برای بررسـی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و تعیین مقادیر عناصر اصلی، فرعی و کمیاب، تعداد ۳ نمونه از رگه و اطراف آن (نمونه‌هـای Jb-6-2، Jb-6-9 و Jb-7) و ۵ نمونـه از سـنگ میزبـان دگرسـان شـده (نمونـه‌هـای Jb-1-1، Jb-1-2، Jb-2، Jb-3 و Jb-5) بـه روش (ICP-MS) در آزمایـشگاه Amdel اسـترالیا مـورد تجزیـه شیمیایی قرار گرفتند که نتایج آن در (جدول ۲) آورده شده‌اند. مقادیر L.O.I نمونه‌های تجزیه شده، نیز در آزمایشگاه سـازمان زمین‌شناسی و پی جویی های مواد معـدنی اسـتان آذربایجـان‌شرقی مورد اندازه‌گیری قرارگرفتند.

جدول ۱ شناسایی کانی‌های مجهول و جدا کردن آن‌ها به روش (XRD).

ردیف	شماره نمونه	کانی‌های اصلی	کانی‌های فرعی
۱	Jb-1-1	کوارتز-کائولینیت-سریسیت-ایلیت	دولومیت-پیریت-آلبیت
۲	Jb-3	کوارتز-سریسیت-ایلیت	کائولینیت-پیریت-آنکریت
۳	Jb-11	کوارتز-سریسیت-کائولینیت-ایلیت	کلسیت

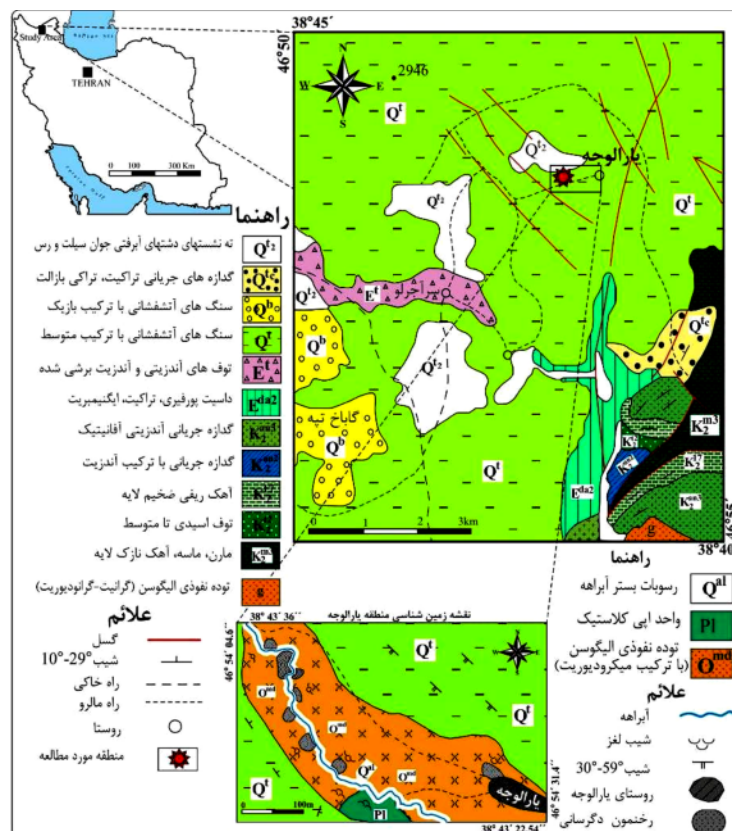
جدول ۲ تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌های سنگ نیمه‌آتشفشانی دگرسان شده به روش (ICP-MS).

شماره نمونه	DL	Jb-1-1	Jb-1-2	Jb-2	Jb-3	Jb-5	Jb-6-2	Jb-6-9	Jb-7
عناصر اصلی بر حسب در صد می‌باشند و SiO_2 بر اساس LOI محاسبه شده است.									
SiO_2	-	۵۸٫۰۳	۵۹٫۵۷	۵۲٫۲۴	۵۷٫۰۰	۴۰٫۰۲	۲۳٫۴۲	۴۲٫۵۱	۴۸٫۹۱
TiO_2	۱۰	۰٫۸۷	۰٫۸۳	۰٫۷۴	۰٫۷۰	۰٫۴۶	۰٫۵۳	۰٫۷۶	۰٫۹۱
Al_2O_3	۱۰	۱۶٫۰۸	۱۴٫۰۰	۱۵٫۷۰	۱۴٫۷۰	۷٫۹۰	۹٫۰۱	۱۲٫۰۰	۱۴٫۰۰
MgO	۱۰	۱٫۷۳	۱٫۶۶	۲٫۱۹	۲٫۱۹	۳٫۴۷	۳٫۲۶	۲٫۲۶	۲٫۵۱
MnO	۲	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۱۷	۰٫۱۶	۰٫۴۲	۰٫۴۳	۰٫۱۹	۰٫۲۴
Fe_2O_3×	۱۰۰	۵٫۲۲	۵٫۸۵	۵٫۲۵	۴٫۵۷	۷٫۴۷	۱۶٫۵۶	۱۲٫۰۰	۸٫۰۰
CaO	۱۰	۲٫۹۳	۲٫۸۰	۶٫۹۰	۴٫۶۰	۱۳٫۳۰	۸٫۳۸	۳٫۶۴	۳٫۶۴
Na_2O	۱۰	۰٫۱۹	۰٫۲۰	۰٫۳۰	۰٫۱۶	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۷	۰٫۱۲
K_2O	۱۰	۳٫۶۰	۳٫۱۸	۳٫۱۶	۴٫۰۲	۰٫۷۵	۲٫۰۹	۲٫۷۲	۳٫۰۲
P_2O_5	۵	۰٫۱۵	۰٫۱۴	۰٫۱۱	۰٫۰۷	۰٫۰۹	۰٫۱۱	۰٫۱۲	۰٫۱۶
S	۵۰	۲٫۳۷	۲٫۷۶	۲٫۹۲	۲٫۶۸	۲٫۳۰	۱۶٫۲۸	۹٫۵۰	۴٫۶۵
L.O.I	-	۸٫۷۰	۸٫۹۰	۱۰٫۳۰	۹٫۱۰	۲۳٫۸۰	۱۹٫۸۰	۱۴٫۲۰	۱۳٫۲۰
Total%	-	۹۹٫۹۹	۱۰۰٫۰۱	۹۹٫۹۹	۹۹٫۹۶	۱۰۰٫۰۵	۱۰۰٫۰۴	۹۹٫۹۷	۹۹٫۳۶

بحث و بررسی

زمین‌شناسی

منطقه‌ی یارالوجه به عنوان بخشی از نوار ماگمائی البرز-آذربایجان [۸]، در ورقه‌ی زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ ورزقان در شمال‌غرب اهر واقع شده است (شکل ۱). فعالیت‌های ماگمایی در این منطقه بیشتر شامل مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی متوسط تا فلسیک است. سنگ‌های آذرآواری و آتشفشانی بازالتی و آندزیتی به سن پلیوکواترنری، توده‌های آتشفشانی داسیتی و نفوذی گرانودیوریتی، کوارتزمونزونیتی و میکرومونزونیتی به سن الیگوسن را پوشانده است. باتولیت گرانیتوئیدی شیور، توده‌ی نفوذی درنزدیکی گستره‌ی مورد بررسی است که با کانی‌سازی نوع اسکارنی در حواشی مشخص می‌شود که به درون سنگ‌های کربناتی و فیلیشوئیدی کرتاسه فوقانی و سنگ‌های آتشفشانی ائوسن تزریق شده است و در جنوب‌شرق گستره‌ی مورد بررسی رخنمون دارد. توده‌ی پورفیری علی جواد در جنوب شرقی این توده که حاوی کانی-سازی مس-طلای پورفیری است به درون توده‌ی گرانیتوئیدی شیور تزریق شده است. با توجه به نشانه‌های دگرسانی و بافتی بین توده نیمه‌آتشفشانی یارالوجه با توده‌ی علی جواد احتمال دارد سن نفوذ آن‌ها مشابه هم باشد [۷]. شکل جایگیری سنگ‌های یاد شده بیشتر به صورت مجموعه‌های آتشفشانی و توده‌های نیمه‌آتشفشانی است که در بخش‌های شمال‌غربی منطقه‌ی مورد بررسی رخنمون‌هائی از توده‌های شبه‌آتشفشانی دگرسان شده در اثر زمین لغزش دیواره دره‌ها قابل مشاهده است (شکل ۲). دگرسانی‌های گرمابی در منطقه‌ی یارالوجه حدود ۱ کیلومتر مربع وسعت دارد و رخنمون آن‌ها در منطقه محدود به دیواره‌ی دره‌هاست. این دگرسانی‌ها تمام واحدهای سنگی منطقه را جز واحدهای آتشفشانی دوران چهارم، تحت تأثیر قرار داده و تغییرات شیمیایی و کانی‌شناسی گسترده‌ای در آن‌ها ایجاد کرده است. سنگ‌های شبه‌آتشفشانی این منطقه به صورت فراگیر دگرسان شده و با شبکه‌ی نامنظمی از رگه-رگچه‌های کربناتی، کوارتزی و سولفیدی قطع شده است. از میان کانی‌های سولفیدی، پیریت از فراوانی بیشتری برخوردار بوده و علاوه بر رخنمون رگه-رگچه‌ای به صورت پراکنده و داربستی نیز در سنگ‌های دگرسان شده دیده می‌شود.



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد بررسی ([۷] با تغییرات).



شکل ۲ رخنمون‌هائی از سنگ‌های نیمه آتشفشانی منطقه یارالوجه که به طور فراگیر دگرسان شده‌اند، (دید به سمت شمال‌غرب).

ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی کانسنگ

کانی‌شناسی کانسنگ نسبتاً ساده بوده و بیشتر از مجموعه کانی‌های فلزی سولفیدی شامل پیریت، اسفالریت، گالن و کالکوپیریت تشکیل شده است. براساس بررسی‌های سنگ-نگاری، پیریت کانی سولفیدی اصلی بوده و به صورت درشت بلورهای شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با اندازه‌ی بسیار ریز تا ۲ سانتی‌متر در رگه‌ها و سنگ میزبان دگرسان شده دیده می‌شود. از نظر بافتی پیریت‌ها به دو نسل قابل تفکیک‌اند، در مرحله‌ی اصلی دگرسانی پیریت‌های نسل اول در نتیجه فعالیت‌های فراگیر سیال گرمابی تشکیل شده و به صورت بلورهای ریز و درشت افشان (شکل ۳-الف) و رگه-رگچه‌های داربستی (شکل ۳-ب) در توده نیمه آتشفشانی دگرسان شده دیده می‌شوند. نسل دوم پیریت‌ها رگه-رگچه‌ای بوده و به صورت مجموعه‌های پیریت-اسفالریت-گالن-کالکوپیریت-کوارتز-کربنات، پیریت‌های داربستی نسل اول را قطع کرده و دارای سطح تماس مشخص با سنگ دیواره دگرسان شده هستند (شکل ۳-پ). از دیگر ویژگی‌های بافتی پیریت‌های پرکننده فضاهای خالی و رگه-رگچه‌ای، می‌توان به بافت کاتاکلاستی و جانشینی اکسیدهای آهن در شکستگی‌های آن اشاره کرد (شکل ۳-ت و ث).

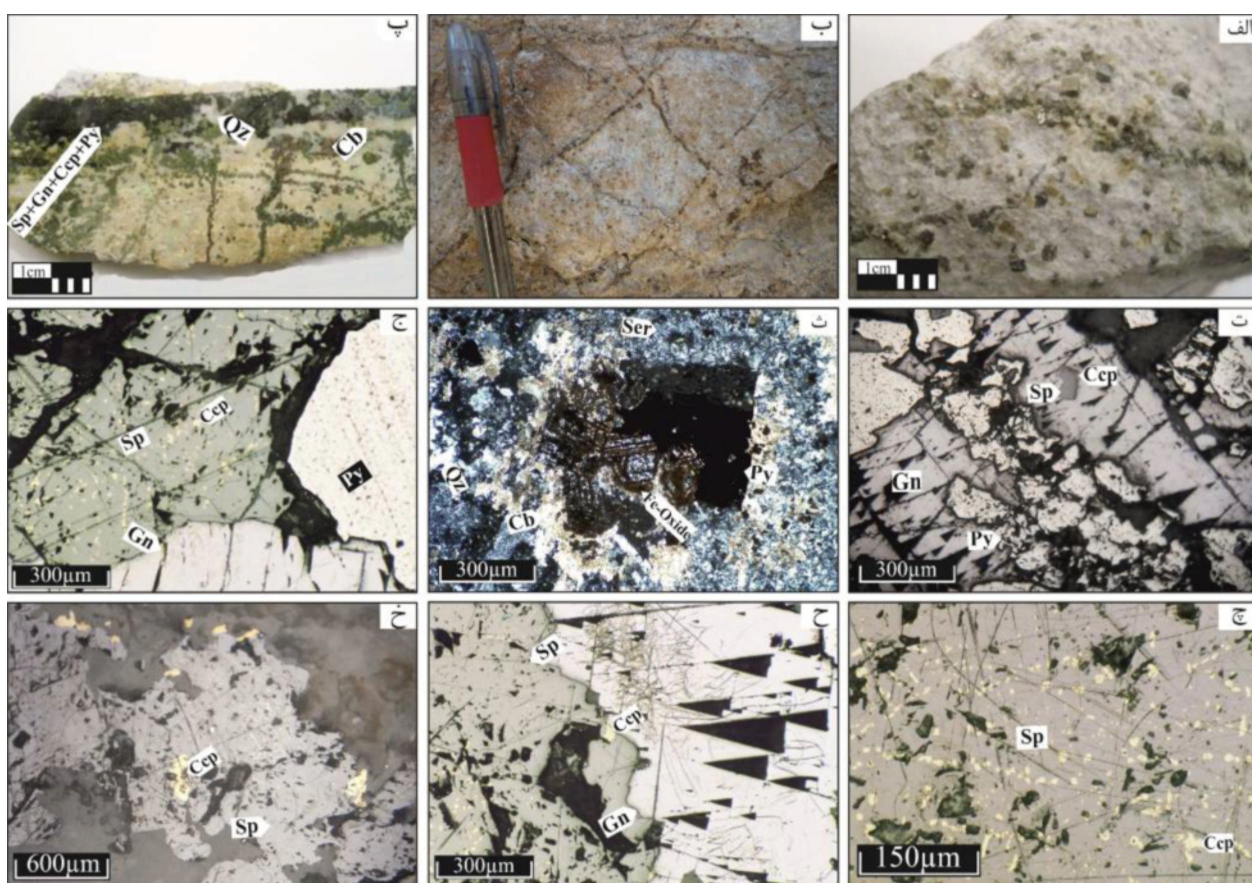
اسفالریت با تظاهر رگه‌ای و به صورت بلورهای نیمه‌شکل‌دار با اندازه ۰٫۲ تا ۴ میلی‌متر همراه با گالن، کالکوپیریت، پیریت، کوارتز و کربنات‌ها دیده می‌شود (شکل ۳-پ). از ویژگی‌های چشمگیر اسفالریت‌ها در مقاطع میکروسکوپی، می‌توان به رشد تماسی اسفالریت با گالن و بافت برونرستی کالکوپیریت از آن اشاره کرد (شکل ۳-ج)، که بیماری کالکوپیریت نیز نامیده می-شود [۹، ۱۰]. در این بافت ناآمیختگی‌های کالکوپیریت به صورت ادخال‌های پراکنده در متن و اطراف اسفالریت قابل مشاهده‌اند (شکل ۳-چ)، که براساس [۱۱]، این پدیده‌ی بافتی در دمای کمتر از ۴۰۰°C آغاز شده و می‌توان آن را معیار مناسبی برای دمای کانی‌سازی در نظر گرفت.

گالن به صورت بلورهای بی‌شکل با اندازه‌ی ۰٫۵-۲٫۵ میلی-متر، حضور دارد که با رنگ سفید مایل به خاکستری روشن، و رخ مثلثی و فاقد چند رنگی در رگه‌ها همراه با دیگر کانه‌های سولفیدی و کوارتز قابل تشخیص است. بررسی‌های بافتی روی رگه‌های دربردارنده‌ی گالن نشان دهنده‌ی رشد تماسی اسفالریت با گالن است که شاهدی برای تشکیل همزمان این دو کانی در رگه‌هاست (شکل ۳-ح).

کالکوپیریت تنها کانی سولفیدی مس در منطقه‌ی مورد بررسی است و نسبت به دیگر کانی‌های سولفیدی در رگه‌ها از فراوانی کمتری برخوردار است. این کانی به صورت ادخال‌های بی‌شکل در اندازه‌های ۲۶ الی ۱۰۰µ در متن اسفالریت، و نیز به صورت بلورهای با اندازه‌ی متوسط ۳۰۰µ در تماس با اسفالریت و دیواره‌ی رگچه‌ها دیده می‌شود (شکل ۳-خ).

کانی‌شناسی و زمین‌شیمی دگرسانی‌های گرمابی

بررسی‌های بافتی و کانی‌شناسی در این منطقه نشان دهنده‌ی دگرسانی گرمابی به دو صورت جانشینی در بطن کانی‌های قبلی و نهشت مستقیم در فضاهای خالی و شکستگی‌هاست. کانی‌های کوارتز، سریسیت، ایلیت، کائولینیت، کلسیت، دولومیت، آنکریت، لوکوکسن و آلبیت از مهم‌ترین کانی‌های شناسایی شده در مجموعه‌های دگرسانی هستند که به صورت دگرسانی‌های سریسیتی و کربناتی شدن در منطقه مشخص می‌شوند.



شکل ۳ تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی کانی‌سازی در منطقه یارالوجه؛ الف) پیریت‌های نسل اول با بافت افشان، ب) پیریت با بافت رگه-رگچه‌ای و داربستی، پ) پیریت‌های رگه‌ای نسل دوم همراه با اسفالریت، گالن، کالکوپیریت، کوارتز و کربنات که رگچه‌های داربستی و کانه‌های افشان را قطع کرده‌اند، ت) بافت کاتاکلاستی پیریت‌های نسل دوم درون رگه‌ها، ث) تجزیه‌ی پیریت‌ها به اکسید آهن و نهشته شدن آن‌ها در رخ-های کانی‌های کربناته، ج) رشد تماسی اسفالریت، گالن و پیریت همراه با بافت برونرستی کالکوپیریت در اسفالریت، چ) ناآمیختگی کالکوپیریت به-صورت ادخال‌های پراکنده در متن اسفالریت، ح) رشد تماسی گالن با اسفالریت که شاهدی بر تشکیل همزمان آن‌هاست، خ) بلورهای کالکوپیریت در متن و اطراف اسفالریت، از تصاویر میکروسکوپی شکل ث، در نور (XPL) و بقیه در نور (PPL) گرفته شدند. (علائم اختصاری کانی‌ها از، Py= Pyrite, Ccp=Chalcopyrite, Gn=Galena, Sp=Sphalerite, Cb=Carbonate mineral, Qz=Quartz, Ser=Sericite [۱۲]).

دگرسانی سریسیتی در منطقه‌ی مورد بررسی به رنگ سفید مایل به خاکستری روشن همراه با شبکه‌ی بهم پیوسته‌ای از رگه-رگچه‌های داربستی مشخص می‌شود. این دگرسانی که بیشتر از کانی‌های سریسیت، ایلیت، کوارتز، پیریت، لوکوکسن و کربنات‌ها تشکیل شده است (جدول ۳)، رگه‌هایی با محتوای پیریت (شکل ۴-الف)، پیریت-کوارتز (شکل ۴-ب)، پیریت-کوارتز-کربنات‌های تأخیری (شکل ۴-پ) و اسفالریت-گالن-پیریت-کالکوپیریت-کوارتز-کلسیت (شکل ۴-ت-ث) را دربرگرفته است. سریسیت کانی غالب این دگرسانی بوده (۲۰ تا ۳۵ درصد) و به صورت پولک‌های سفید رنگ ریز دانه (شکل ۴-ج) تا ۱ میلی‌متر با بافت اسفرولیتی (شکل ۴-چ)، در زمینه-ی سنگ، سطح فلدسپارها و اطراف کانی‌های فرومنیزین دیده می‌شوند (شکل ۴-ح). برای کنترل نتایج حاصل از بررسی‌های کانی‌شناسی، از داده‌های زمین‌شیمیایی عناصر اصلی استفاده شد. براساس این داده‌ها مقدار حداقل و حداکثر اکسیدهای K_2O، Na_2O، CaO، MgO و Fe_2O_3 در این دگرسانی به ترتیب از ۲/۷۵ تا ۴/۰۲ درصد برای K_2O، ۰/۰۷۲ تا ۰/۱۹۹ درصد برای Na_2O، ۲/۸ تا ۴/۶ درصد برای CaO، ۱/۶۶ تا ۲/۵ درصد برای MgO و ۲/۵۷ تا ۱۲ درصد برای Fe_2O_3 در تغییر

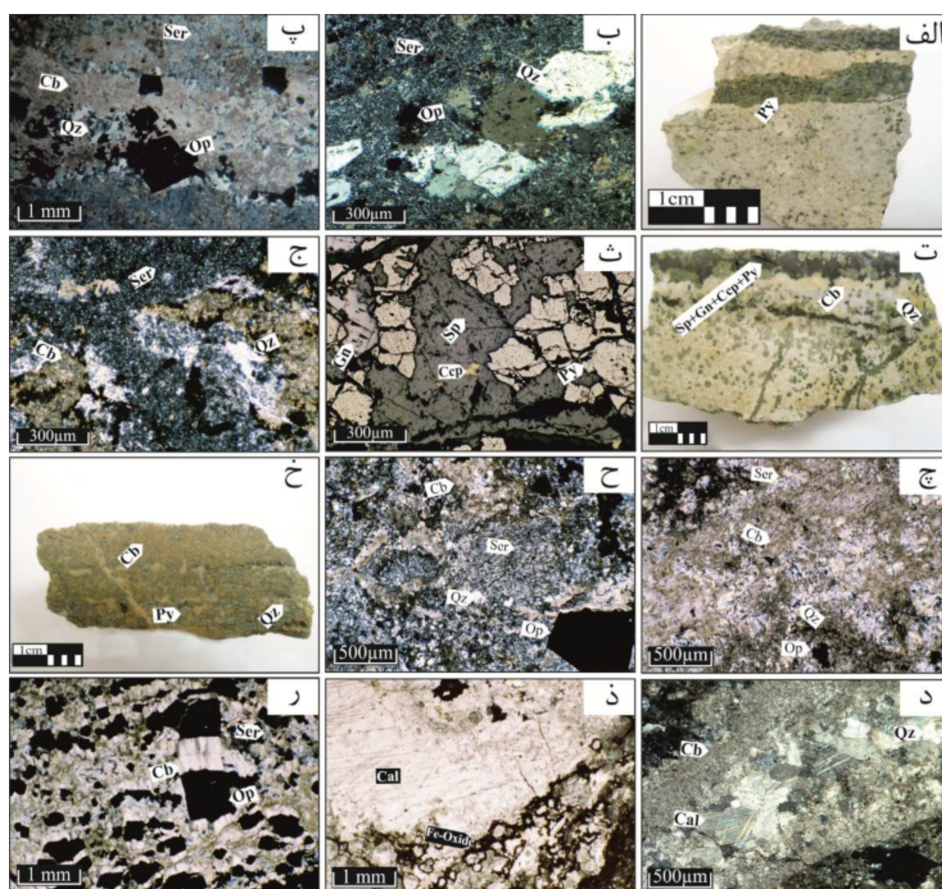
است که با نتایج حاصل از بررسی‌های کانی‌شناسی همخوانی دارد (شکل ۵).

با ادامه فرآیند دگرسانی، کربناتی شدن دگرسانی غالب در منطقه بوده و در بیشتر موارد با دگرسانی سریسیتی هم‌پوشی دارد و به رنگ‌های سفید مایل به زرد، زرد کم‌رنگ و قهوه‌ای روشن دیده می‌شود (شکل ۴-خ). براساس نتایج حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی و پراش پرتو ایکس (XRD) این دگرسانی با اجتماع کانیایی کلسیت، دولومیت، آنکریت، آلبیت و کوارتز مشخص می‌شود (جدول ۳). کلسیت و دولومیت به عنوان فراوان‌ترین کانی کربناتی این دگرسانی به صورت پرکننده فضای خالی (شکل ۴-د تا ذ)، جانشینی در پلاژیوکلاز، زمینه‌ی سنگ و در حاشیه‌ی پیریت‌ها (شکل ۴-ر) دیده می‌شوند. بررسی روند تغییرات اکسیدهای اصلی در این دگرسانی نشانگر افزایش فراوانی CaO (۶/۹ تا ۱۳/۳ درصد)، MgO (۲/۱۹ تا ۳/۴۷ درصد) و Na_2O (۰/۰۷۱ تا ۰/۳۰۷ درصد) است که با حضور کانی‌های کلسیت، دولومیت و آلبیت همخوانی دارد (شکل ۵) [۱۳].

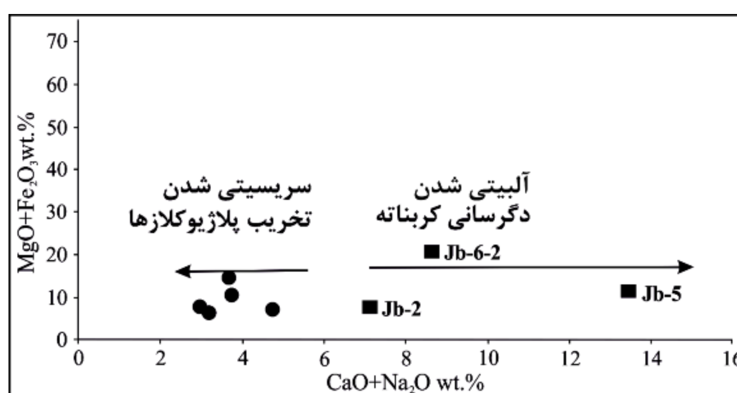
در منطقه‌ی مورد بررسی بخش‌های فوقانی توده‌ی نیمه-آتشفشانی دگرسان شده، تحت تأثیر هوازدگی و دگرسانی برونزاد قرار گرفته است (شکل ۶). براساس نتایج حاصل از پراش پرتو X (XRD) و مشاهدات صحرایی این بخش از کانی-های کائولینیت، ایلیت، هماتیت، لیمونیت، سریسیت و کوارتز تشکیل شده (جدول ۳)، و به رنگ‌های سفید، زرد و قهوه‌ای دیده می‌شود. با توجه به گسترش سطحی این کانی‌ها و اکسید شدن پیریت‌ها، احتمالاً محلول اسیدی حاصل از اکسایش پیریت [۱۴] سبب تشکیل اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن شده و این واکنش بر اسیدی شدن گرماب افزوده است و در اثر فعالیت این شاره‌ی اسیدی کائولینیت و سایر کانی‌های رسی روی دگرسانی درونزاد تحمیل شده است.

جدول ۳ کانی‌شناسی انواع مختلف منطقه‌های دگرسان موجود در منطقه‌ی یارالوجه.

دگرسانی	کانی‌شناسی	فراوانی کانی‌ها			توضیحات
		رایج	متوسط تا کم	کمیاب	
سریسیتی	سریسیت	+			دگرسانی رایج در منطقه که سنگ‌های نیمه آتشفشانی را تحت تأثیر قرار می-دهد. در منطقه مورد بررسی به رنگ سفید مایل به خاکستری روشن همراه با شبکه بهم‌پیوسته‌ای از رگه-رگچه‌های داربستی مشخص می‌شود. این دگرسانی به طور عمده از کانی‌های سریسیت، ایلیت، کوارتز، پیریت، لوکوکسن و کربنات‌ها تشکیل شده است
	کوارتز	+			
	پیریت	+			
	کربنات		+		
	ایلیت		+		
	لوکوکسن			+	
کربناتی	کلسیت	+			با ادامه فرآیند دگرسانی، کربناتی شدن دگرسانی غالب در منطقه بوده و در بیشتر موارد با دگرسانی سریسیتی هم‌پوشانی دارد و به رنگ‌های سفید مایل به زرد، زرد کم‌رنگ و قهوه‌ای روشن دیده می‌شود.
	دولومیت	+			
	کوارتز		+		
	آنکریت			+	
	آلبیت			+	
هوازدگی سوپرژن	کائولینیت	+			در منطقه مورد بررسی بخش‌های فوقانی توده نیمه آتشفشانی دگرسان شده، تحت تأثیر هوازدگی و دگرسانی برونزاد قرار گرفته است و به رنگ‌های سفید، زرد و قهوه‌ای مایل به قرمز دیده می‌شود. با توجه به گسترش سطحی این کانی‌ها و اکسید شدن پیریت‌ها به نظر می‌رسد احتمالاً محلول اسیدی حاصل از اکسایش پیریت عامل اصلی تحمیل دگرسانی برونزاد می‌باشد.
	ایلیت	+			
	هماتیت	+			
	لیمونیت	+			
	سریسیت		+		
	کوارتز		+		
	کلسیت			+	



شکل ۴ تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی از دگرسانی‌های گرمابی مشاهده شده در شاخص رگه‌ای یارالوجه؛ الف) رگه‌های پیریتی، ب) رگچه‌های کوارتز-پیریت، پ) رگچه‌های کوارتز-پیریت-کربنات، ت، ث) رگه حاوی اسفالریت، گالن، پیریت، کالکوپیریت، کوارتز و کربنات، ج) سریسیت‌های ریز دانه در زمینه‌ی سنگ به همراه کانی‌های کوارتز و کربنات، چ) هم‌پوشی سریسیت‌های درشت بلور با کانی‌های کربناتی، ح) سریسیت‌های تشکیل شده در سطح و اطراف کانی‌های فلدسپار، خ) دگرسانی کربناتی با رنگ قهوه‌ای روشن تا زرد کم رنگ، د) تشکیل کربنات‌ها در شکستگی‌ها و فضاهای خالی که در وسط رگچه‌ها کلسیت‌های خاکستری رنگ با بلورهای ریزتر نهشته شده‌اند، ذ) کلسیت‌های با رنگ روشن و بلورهای درشت‌تر نهشته شده درون رگه-رگچه‌ها، که از حاشیه با اکسیدآهن پوشیده شده‌اند، ر) کلسیت‌های نهشته شده در اطراف پیریت. از تصاویر میکروسکوپی شکل ث، در نور (PPL) و بقیه در نور (XPL) گرفته شده‌اند. Cal=Calcite, Cb=Carbonate mineral, Qz=Quartz, Pl=Plagioclase, Ser=Sericite, Op=Opaque, Py= Pyrite, Ccp=Chalcopyrite, Gn=Galena, Sp=Sphalerite (علائم اختصاری کانی‌ها از، [۱۲]).



شکل ۵ تفکیک رخساره‌های دگرسان بر حسب $CaO + Na_2O$ در برابر $MgO + Fe_2O_3$ در نمونه‌های مورد بررسی، (نمودار پایه از [۱۳]).



شکل ۶ هوازدگی بخش‌های فوقانی توده‌ی نیمه‌آتشفشانی دگرسان شده الیگوسن که به وسیله بازالت‌های پلیوکواترنری پوشیده شده است، (دید به سمت شمال‌شرق).

دنباله‌ی پاراژنزی

کانی‌های تشکیل دهنده‌ی کانسنگ و سنگ میزبان کاملاً دگرسان شده اندیس رگه‌ای یارالوجه در ۵ گروه شامل کانی-های سولفیدی (پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و گالن)، کانی-های سیلیکاتی (سریسیت، ایلیت، کائولینیت، آلبیت و کوارتز)، کربنات‌ها (کلسیت، دولومیت و آنکریت)، کانی‌های تیتانیم‌دار (لوکوکسن) و اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن‌دار (هماتیت و لیمونیت) قرار می‌گیرند. براساس بررسی‌های صحرایی، روابط بافتی و کانی‌شناسی چهار مرحله کانی‌سازی در این شاخص شناسایی شدند (جدول ۴). مرحله‌ی اول (I) با کانی‌سازی پیریت‌های افشان و داربستی، همراهی پیریت و کوارتز در رگه-ها و تشکیل کانی‌های گرمابی از قبیل سریسیت، ایلیت، آلبیت، لوکوکسن، کوارتز و کربنات‌ها مشخص می‌شود. در مرحله‌ی دوم (II) تشکیل کوارتز، کربنات‌ها و پیریت ادامه یافته و منجر به تشکیل رگه‌های دربردارنده‌ی کانه‌زایی اصلی شده است. این مرحله از نظر کانی‌سازی سولفیدی دارای اهمیت است و به ترتیب فراوانی با حضور اسفالریت، پیریت، گالن و کالکوپیریت مشخص می‌شود. مرحله‌ی سوم (III) با کانی‌سازی رگه‌ای کربنات‌ها مشخص می‌شود. در این رگه‌ها کانی‌های کربناتی به صورت جریانی، پیریت‌های تشکیل شده در مرحله اول کانی-سازی را در بر گرفته و در بعضی از موارد شکستگی‌های ناشی از فشار گرماب موجود در بلورهای پیریت را پر کرداند. سرانجام مرحله‌ی چهارم شامل کانی‌های برونزاد (هماتیت، لیمونیت و کائولینیت) است.

زمین‌شیمی کانسنگ

نتایج تجزیه شیمیایی عناصر کمیاب در ۸ نمونه از رگه‌ها و سنگ میزبان دگرسان شده نشان می‌دهد که مقدار میانگین غلظت عناصر Pb، Zn، Cu و Ag به ترتیب ۵۳۰، ۶۶۹۰، ۱۱۴٫۳ و ۳٫۶۷ بخش در میلیون (ppm) است، که حداکثر غلظت آن‌ها در رگه‌ی حاوی کانه‌زائی است. بررسی همبستگی پیرسون بین این عناصر نشان‌دهنده‌ی بیش‌ترین همبستگی مثبت بین عناصر Ag-Cu، Ag-Zn، Zn-Cu، As-Ag، As-Cu، As-Zn، Cd-Ag، Cd-Cu، Cd-Zn، Cd-As، Rb-Ta، Nb-Rb و Nb-Ta به ترتیب با ضریب همبستگی ۰٫۹۹، ۰٫۹۹، ۰٫۹۸، ۰٫۹۸، ۰٫۹۶، ۰٫۹۸، ۰٫۹۹، ۰٫۹۸، ۱، ۰٫۹۸، ۰٫۸۳، ۰٫۸۶ و ۰٫۹۸ است (جدول ۵). همبستگی خوب بین فلزات مس، سرب و روی با کانی‌های شناخته شده در این شاخص رگه‌ای سازگار بوده و نشان دهنده‌ی این است که این فلزات در کانی‌های سولفیدی حضور دارند (مانند کالکوپیریت، اسفالریت و گالن). همبستگی مثبت Ag، As، Cd با Cu و Zn پیشنهاد می‌کند که این عناصر احتمالاً در کانی‌های مشابهی همراه با هم تشکیل شده‌اند.

جدول۴ توالی پاراژنزی برای شکل‌گیری کانه‌ها و کانی‌های دگرسانی موجود در شاخص رگه‌ای یارالوجه.

مرحله / کانی ها	اولیه			تأخیری
	درونزاد			برونزاد
	مرحله I	مرحله II	مرحله III	
دگرسانی				
سریسیتی				
کربناتی شدن				
کانی سازی				
اسفالریت				
گالن				
کالکوپیریت				
کانی های باطله				
کوارتز گرمابی				
پیریت				
کانی های رسی				
لوکوکسن				
اکسید و هیدرواکسید Fe				

جدول ۵ ماتریس همبستگی پیرسون بین عناصر جزئی و کمیاب اندازه‌گیری شده در نمونه‌های منطقه‌ی مورد بررسی، همبستگی مثبت در سطح اطمینان ٪۹۵ و اعداد برجسته در سطح اطمینان ٪۹۹ اندازه گیری شده‌اند.

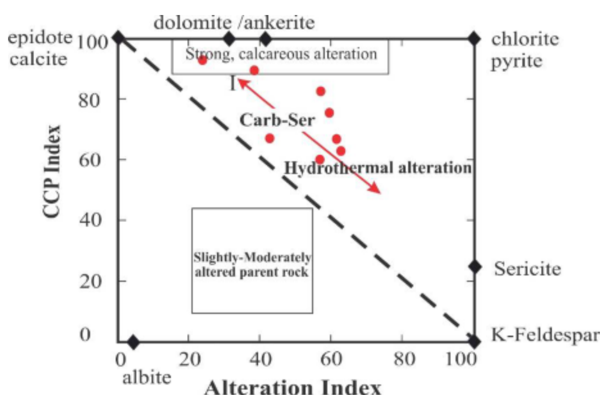
	Ag	Cu	Zn	Pb	As	Sb	Ni	Ti	Cd	Rb	Sr	Ta	Nb
Ag	۱												
Cu	۰/۹۹	۱											
Zn	۰/۹۹	۰/۹۸	۱										
Pb	۰/۳۸	۰/۲۹	۰/۳۷	۱									
As	۰/۹۸	۰/۹۶	۰/۹۸	۰/۵۰	۱								
Sb	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۵	۱							
Ni	۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۶۲	۰/۶۰	۰/۵۵	۰/۲۴	۱						
Ti	-۰/۴۴	-۰/۴۸	-۰/۴۸	۰/۲۲	-۰/۴۲	-۰/۱۹	۰/۱۵	۱					
Cd	۰/۹۹	۰/۹۸	۱/۰	۰/۳۸	۰/۹۸	۰/۴۴	۰/۵۲	-۰/۴۸	۱				
Rb	-۰/۷۰	-۰/۷۱	-۰/۷۴	-۰/۳۹	-۰/۷۷	-۰/۰۶	-۰/۲۳	۰/۶۳	-۰/۷۴	۱			
Sr	-۰/۲۹	-۰/۲۸	-۰/۲۶	-۰/۴۹	-۰/۳۰	-۰/۲۸	-۰/۷۷	۰/۰۵	-۰/۲۶	۰/۲۱	۱		
Ta	-۰/۴۷	-۰/۴۶	-۰/۵	-۰/۵۸	-۰/۵۷	-۰/۱۶	-۰/۲۶	۰/۵۹	-۰/۵۰	۰/۸۳	۰/۵۹	۱	
Nb	-۰/۴۹	-۰/۴۹	-۰/۵۲	-۰/۵۰	-۰/۵۸	-۰/۱۹	-۰/۳۶	۰/۴۹	-۰/۵۲	۰/۸۶	۰/۵۲	۰/۹۸	۱

شاخص دگرسانی گرمابی

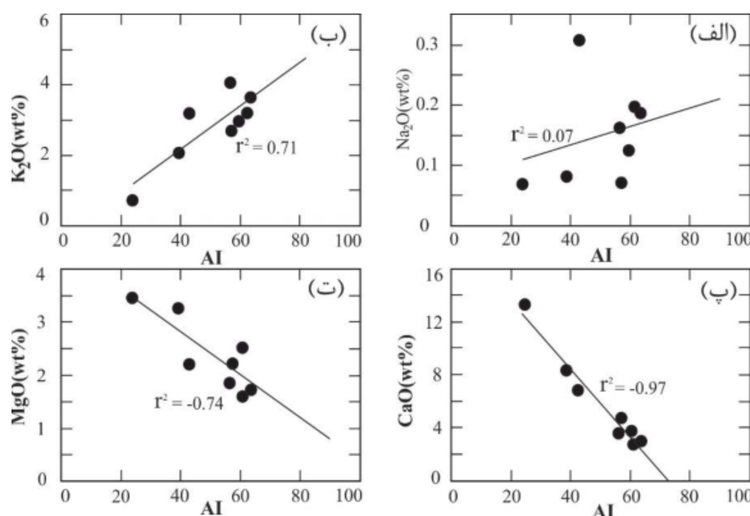
برای درک بهتر دگرسانی گرمابی و تغییرات زمین‌شیمیایی ایجاد شده در شاخص رگه‌ای مورد بررسی، از داده‌های زمین-شیمیایی سنگ دیواره و نمودار جعبه‌ای دگرسانی که به نمایش ترسیمی دگرسانی با استفاده از شاخص دگرسانی ایشیکاوا و شاخص دگرسانی کلریت-کربنات-پیریت می‌پردازد، استفاده شد [۳، ۶]. شاخص AI اولین بار توسط [۱۵]، برای کانسارهای سولفید توده‌ای مطرح شد و سپس همراه با شاخص دگرسانی CCPI توسط [۳،۱۶] برای کانسارهای گرمابی مورد استفاده قرار گرفت. شاخص ایشیکاوا($AI = 100(MgO + K_2O)/K_2O + CaO + Na_2O + MgO$) به بیان کمّی شدت دگرسانی‌های سریسیتی و کلریتی با استفاده از نسبت عناصر سنگ ساز افزوده شده به مجموع عناصر کاسته و افزوده شده طی این نوع دگرسانی‌ها می‌پردازد [۳]، این شاخص از ۲۰ تا ۶۰ در سنگ‌های دگرسان نشده، ۵۰ تا ۹۹ برای سنگ‌های دگرسان شده و ۱۰۰ در سنگ‌های کاملاً دگرسان شده تغییر می‌کند [۶]. از آنجا که شاخص دگرسانی ایشیکاوا در محاسبه‌ی دگرسانی کربناتی و جدا سازی دگرسانی کلریتی و سریسیتی از یکدیگر ناتوان است، از شاخص دگرسانی کلریت-کربنات-پیریت ($CCPI = 100(MgO+FeO)/MgO+FeO+K_2O+Na_2O$)، برای تعیین شدت دگرسانی‌های کلریتی، کربناتی و پیریتی استفاده می‌شود [۳]. این شاخص قادر به تعیین MgO و FeO

افزوده شده به سنگ طی جانشینی کلریت به جای آلبیت، فلدسپار پتاسیم و سریسیت است.

محاسبه‌ی شاخص‌های دگرسانی در ۸ نمونه از سنگ میزبان دگرسان شده و پیاده کردن آن‌ها روی نمودار جعبه‌ای دگرسانی نشان دهنده‌ی قرارگیری نمونه‌ها در قلمرو دگرسانی گرمابی با AI=۲۳-۶۳ و CCPI=۶۰-۹۲ است (شکل ۷). این سنگ از نظر سنگ‌نگاری دارای پلاژیوکلازهای با بیشترین شدت دگرسانی است. با توجه به موقعیت کانی‌های آلبیت، سریسیت، پتاسیم فلدسپار، کلریت، پیریت، دولومیت، آنکریت، کلسیت و اپیدوت روی نمودار جعبه‌ای دگرسانی [۳]، نمونه‌های مورد بررسی در قلمرو دگرسانی گرمابی قرار گرفته و با افزایش پیشرونده دگرسانی گرمابی به سمت دگرسانی‌های سریسیتی و کربناتی متمایل شده‌اند که با شواهد سنگ‌نگاری مبنی بر ظهور و فراوانی کانی‌های گرمابی سریسیت، ایلیت و کربنات‌ها همخوانی دارد. بررسی روندهای دگرسانی‌ها در این نمودار نشان دهنده‌ی یک روند اصلی دگرسانی شامل دگرسانی گرمابی سریسیتی - کربناتی است که با نتایج حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی و کانی‌شناسی نیز همخوانی دارد. برای کنترل این نتایج، تغییرات اکسیدهای Na_2O، K_2O، CaO و MgO نسبت به AI مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی تغییرات Na_2O و K_2O نسبت به AI (شکل ۸-الف-ب)، همبستگی مثبت معنی داری را بین این دو متغیر نشان می‌دهند که بیانگر غنی‌شدگی پتاسیم و اندکی سدیم با پیشرفت دگرسانی و تشکیل کانی‌های ایلیت، سریسیت و آلبیت است. برعکس، تغییرات CaO و MgO (شکل ۸-پ-ت)، نسبت به AI نشان دهنده‌ی همبستگی منفی بین آن‌هاست که دلالت بر شستشوی منیزیم و کلسیم از کانی‌های فرومنیزین و پلاژیوکلاز با پیشرفت دگرسانی گرمابی و تشکیل کربنات‌ها، دارد.



شکل ۷ نمودار جعبه‌ای دگرسانی [شاخص دگرسانی ایشیکاوا (AI) نسبت به شاخص دگرسانی کلریت-کربنات-پیریت (CCPI)] برای داده‌های تجزیه‌ی شیمیایی منطقه‌ی مورد بررسی. روند اصلی دگرسانی با روند I (دگرسانی سریسیتی-کربناته) نشان داده شده است.



شکل ۸ نمودار تغییرات Na_2O، پ) K_2O، ت) CaO، ث) MgO نسبت به شاخص دگرسانی ایشیکاوا.

براورد دمای سیال گرمابی دگرسان‌کننده

بسیاری از کانی‌های دگرسانی در گستره‌ی خاصی از دما و pH پایدارند، که با بررسی گستره پایداری آن‌ها می‌توان اطلاعات مفیدی را از دمای تشکیل و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیالات کانی‌ساز و سیستم‌های گرمابی قدیمی به دست آورد [۴]. کوارتز یکی از محصولات دگرسانی گرمابی در منطقه‌ی مورد بررسی است. این کانی در محیط‌های دگرسان از دمای ۱۰۰ تا بیش از ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و در شرایط pH خنثی تا اسیدی تشکیل می‌شود. فراوانی زیاد این کانی در رگه‌ها و رگچه‌های دربردارنده‌ی پیریت با افزایش نفوذپذیری ثانویه ناشی از عملکرد نیروهای زمین‌ساختی و فشار گرمابی‌ها همخوانی دارد. ایلیت می‌تواند همراه با سیالاتی با دمای ۳۵۰ تا ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و pH نزدیک به خنثی یافت شود [۱۷، ۱۸]. تشکیل سریسیت در مجموعه‌ی کانی‌های دگرسان سنگ دیواره که به فراوانی در منطقه‌ی یارالوجه دیده می‌شوند نشان دهنده‌ی pH خنثی گرماب و دمای بین ۳۰۰ الی ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد سیستم زمین‌گرمابی است [۱۹]. کلسیت در دماهای متفاوت کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تا ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و در شرایط pH خنثی تا قلیایی پایدار است [۴]. حضور کائولینیت در بخش‌های فوقانی توده‌ی نیمه آتشفشانی دگرسان شده به روش پراش پرتو x شناسایی شد. این کانی نشان دهنده‌ی شرایط نسبتاً اسیدی بوده و می‌توان تشکیل آن را به فرآیندهای برونزاد نسبت داد [۲۰]. بر این اساس بررسی دگرسانی‌های گرمابی در منطقه‌ی یارالوجه نشانگر حضور گرماب‌های با pH نزدیک به خنثی و دمای تقریبی ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است (جدول ۶).

جدول ۶ دمای تخمینی براورد شده گرماب کانی‌ساز و دگرسان کننده‌ی منطقه‌ی یارالوجه براساس گستره‌ی پایداری کانی‌های گرمابی مشاهده شده. (pH و گستره پایداری دمایی کانی‌های گرمابی اقتباس از . [۱۷، ۱۹، ۴، ۱۸]).



برداشت

براساس بررسی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی شاخص رگه-ای یارالوجه از مجموعه‌های دگرسان آشکاری شامل دگرسانی سریسیتی، کربناتی و برونزاد برخوردار است که معیار پی‌جویی مفیدی را در اختیار قرار می‌دهد. کانی‌های مشخص کننده هر یک از این دگرسانی‌ها عبارتند از: ۱) سریسیت، کوارتز، پیریت، کربنات، ایلیت و لوکوکسن برای دگرسانی سریسیتی، ۲) کلسیت، دولومیت، آنکریت، کوارتز و آلبیت برای دگرسانی کربناتی و ۳) کائولینیت، ایلیت، هماتیت، لیمونیت، سریسیت، کوارتز و کلسیت برای دگرسانی برونزاد که به‌صورت پوششی وسیع در بخش بالایی شاخص گرمابی تظاهر دارد. دگرسانی گرمابی در منطقه‌ی مورد بررسی از گسترش زیادی برخوردار است و کانی‌های اولیه‌ی سنگ دیواره به وسیله ی کانی‌های گرمابی جانشین شده‌اند که می‌تواند نشانگر نفوذپذیری بالای سنگ باشد.

ترکیب یافته‌های زمین‌شناسی، سنگ‌نگاری و زمین-شیمیایی نشان دهنده‌ی این است که رگه‌ها و مجموعه کانی-های دگرسان گرمابی مشاهده شده در منطقه‌ی مورد بررسی قابل قیاس با کانسارهای وراگرمایی نوع سولفیدی شدن حدواسط و رگه‌های چند فلزی با دما متوسط وابسته‌به کانسارهای مس پورفیری است.

مراجع

[1] Arndt N., Ganino C., "*Metals and Society: an Introduction to Economic Geology*", Springer, (2012) 160p.

[2] Pirajno F., "*Hydrothermal Processes and Mineral Systems*", Springer, (2009) 1250p.

[3] Large R.R., Gemmell J.B., Paulick H., Huston D., "*The alteration box plot: a simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and lithogeochemistry associated with VHMS deposite*", Economic Geology, 96 (2001) 957-972.

[4] White N.C., Hedenquist J.W., "*Epithermal gold deposits: styles, characteristics and Exploration*", Society of Economic Geologists, Newsletter, 23 (1995) 9-13.

[5] Warren I., Simmons S.F., Mauk J.L., "*Whole-rock geochemical techniques for evaluating hydrothermal alteration, mass changes, and compositional with epithermal Au-Ag mineralization*", Economic Geology, 102 (2007) 923-948.

[6] Gemmell J.B., "*Hydrothermal alteration associated whit the Gosonwng epithermal Au-Ag deposit Halmahera, Indonesia; Mineralogy, geochemistry, and exploration implications*", Economic Geology, 102 (2007) 893-922.

[۷] مهرپرتو م.، امینی‌افضل ع.،" *نقشه زمین‌شناسی ورزقان با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰* "، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۱).

[8] Alavi M., "*Sedimentary and structural characteristics of the paleo-Tethys remnants Iran*", Geol. Soc. Of Amer. Bull, 103 (1991) 983-992.

[9] Ixer R.A., Duller P.R., "*Virtual atlas of opaque and ore minerals in their associations*", internet digital atlas, sponsored by SEM (1998).

[10] Maclellan K.L., Lemtz D.R. McClenaghan S.H., "*Petrology, Geochemistry and Genesis of the copper zone at the Burnswick No. 6 volcanogenic massive sulfide deposit, Bathurst mining camp, New Bruswick, Canada*", Exploration and Mining Geology, 15 (2007) 53-75.

[11] Edwards A.B., "*Textures of the ore minerals and their significance*", 2nd ed, Melbourne: Austrasian Inst. Min. Metal (1965) 242p.

[12] Whitney L., Evans W., "*Abbreviations for names of rock-forming minerals*", American Mineralogist, 95 (2010) 185-187.

[13] Karakaya M.C., Karakaya N., Küpeli S., Yavuz F., "*Mineralogy and geochemical behavior of trace elements of hydrothermal alteration types in the volcanogenic massive sulfide deposits, NE Turkey*", Ore Geology Reviews, 48 (2012) 197-224.

[14] Rose A.W., "*Zonal relations of wallrock alteration and sulfide distribution at porphyry copper deposits*", Economic Geology, 65 (1970) 920-936.

[15] Ishikawa Y., Sawaguchi T., Iwaya S., Horiuchi M., "*Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration halos*", Mining Geology, 26 (1976) 105-117.

[16] Gemmell J.B., Large R.R., "*Stringer system and alteration zones underlying the Hellyer volcanic-hosted massive sulfide deposit, Tasmania, Australia*", Economic Geology, 87 (1992) 620-649.

[17] Reyes A.G., "*Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment*", Journal of Volcanology and Geothermal Research, 43 (1990) 279-309.

[18] Simmons S.F., White N.C., John D.A, "*Geological characteristics of epithermal precious and base metal deposits*", Economic Geology 100th Ann (2005) 485-522.

[19] Comsti M.E.C., Villones R.I., Dejesus C.V., Natividad A.R., Rollan L.A., Duroy A.C., "*Mineralization at the Kelly gold mine; Baguio District, Philippines: fluid-inclusion and wall-rock alteration studies*", Geochemical Exploration, 35 (1990) 341-362.

[20] Vikre P.G., "*Precious metal vein systems in the National district, Humbolt County, Nevada*". Economic Geology, 80 (1985) 360-393.